

## تحلیل پایداری سطوح شیبدار مشرف به نیروگاه سد خرسان ۳ تحت بارگذاری زلزله

### به کمک نرم افزار UDEC

مهدی حسینی<sup>۱\*</sup>، رخساره نقدی<sup>۲</sup>

دریافت مقاله: ۹۲/۰۲/۲۱ پذیرش مقاله: ۹۲/۰۹/۲۷

#### چکیده

تحلیل پایداری شیروانی‌های سنگی به کمک روش‌هایی مانند تعادل حدی، عددی، تجربی و تصاویر استریوگرافیکی صورت می‌پذیرد. روش تحلیل با توجه به شرایط محلی و نوع پتانسیل گسیختگی و با در نظر گرفتن محتاطانه ضعف‌ها، قوت‌ها و محدودیت‌های هر روش انتخاب می‌شود. در این تحقیق پایداری سطوح شیبدار مشرف به نیروگاه سد خرسان ۳ در اثر بارگذاری زلزله بررسی می‌گردد. در هنگام وقوع زمین لرزه‌های بزرگ خسارت فراوانی به سازه‌های سطحی وارد می‌شود و با توجه به اینکه بار دینامیکی زلزله یکی از عواملی است که می‌تواند شیب‌های سنگ را ناپایدار سازد برای ارزیابی پایداری سطوح شیبدار در مقابل زلزله می‌توان از تحلیل دینامیکی استفاده کرد. در این تحقیق ابتدا با بررسی گزارش‌ها و اطلاعات موجود و برداشت‌های زمین‌شناسی در منطقه، اطلاعات لازم جهت تحلیل پایداری شیروانی، استخراج می‌گردد و سپس تحلیل پایداری شیروانی در سه مرحله صورت می‌گیرد: مرحله اول، تحلیل پایداری استاتیکی به کمک روش عددی، مرحله دوم، تحلیل پایداری دینامیکی تحت بارگذاری زلزله به کمک روش عددی و در مرحله سوم، تحلیل پایداری شبه استاتیکی انجام می‌شود. برای بررسی پایداری سطوح شیبدار سنگی به کمک روش عددی از نرم‌افزار UDEC استفاده می‌گردد. این نرم‌افزار براساس روش المان مجزا کار می‌کند و در محیط‌هایی که ناپوستگی‌ها نقش اساسی را در رفتار سنگ ایفا می‌کنند کاربرد دارد. نتایج تحلیل نشان می‌دهد شیروانی مشرف به نیروگاه سد خرسان ۳ تحت بارگذاری زلزله ناپایدار است و بنابراین نصب سیستم نگهداری ضروری است. تحلیل پایداری شبه استاتیکی و محاسبه فاکتور ایمنی شیروانی مشرف به ساختگاه نیروگاه سد خرسان ۳ به ازای ضریب زلزله ۰/۲ و ۰/۳ نیز انجام شد. نتایج حاصل از این تحلیل نشان می‌دهد که شیروانی مذکور ناپایدار است. نتیجه مشابه تحلیل پایداری به کمک نرم‌افزار UDEC است.

**کلید واژه‌ها:** تحلیل پایداری، سد، بارگذاری زلزله، سطوح شیبدار سنگی، محیط ناپیوسته

۱. استادیار دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی معدن، meh\_hosseini18@yahoo.com

۲. دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی معدن، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، rokhsareh\_3823@yahoo.com

\* مسئول مکاتبات

## ۱. مقدمه

با توجه به وجود ناپیوستگی‌هایی مانند ۵ گسل، ۳ دسته درزه و یک لایه‌بندی در شیروانی مذکور، و پیچیدگی ژئومتری آن از روش عددی برای مدل‌سازی استفاده شده است. وجود ناپیوستگی در منطقه باعث شده است نرم‌افزار UDEC که برای مدل کردن محیط‌های ناپیوسته است مورد استفاده قرار گیرد. مطالعات کتابخانه‌ای نشان می‌دهد تحلیل پایداری سطوح شیبدار متعددی در کشور تحت بار استاتیکی و به کمک نرم‌افزار UDEC انجام شده است. اما فقط در چند پروژه در کشور تحلیل پایداری سطوح شیبدار تحت بارگذاری زلزله بررسی شده است که می‌توان به تحلیل پایداری تکیه‌گاه راست سد گتوندعلیا در برابر زلزله (شریفی و همکاران، ۱۳۹۰) و تحلیل پایداری بلوک‌های تکتونیک معدن چغارت تحت بارگذاری زلزله (Azhari et al., 2012) اشاره کرد.

در این مقاله با توجه به لرزه‌خیزی منطقه نیروگاه سد خرسان ۳ بررسی پایداری شیروانی مشرف به نیروگاه که هدف این تحقیق است انجام شده است.

## ۲. شرایط زمین‌شناسی و مشخصات ژئومکانیکی ساختگاه

## نیروگاه سد خرسان ۳

محدوده مورد مطالعه در استان چهارمحال و بختیاری و ۴۶ کیلومتری جنوب شرقی شهرستان لردگان و حدود ۱/۵ کیلومتری پائین‌دست روستای طلایه واقع شده است. مختصات جغرافیایی ساختگاه مورد مطالعه ۳۱° ۱۴' ۵۰" عرض شمالی و ۵۰° ۵۸' ۲۵" طول شرقی می‌باشد. دسترسی به محل سد از طریق جاده آسفالت لردگان به روستای آتشگاه و طلایه امکان‌پذیر می‌باشد. از کنار جاده مذکور تا محل سد حدود ۹۰۰ متر فاصله را باید پیاده طی نمود. در شکل (۱) موقعیت کلی طرح نمایش داده شده است.

محدوده محل سد و دریاچه خرسان ۳ در زون زمین‌شناسی زاگرس چین‌خورده واقع شده است که اختصاصات کلی آن به شرح زیر می‌باشد:

تحلیل پایداری شیروانی‌ها عموماً جهت یک طراحی عملی مطمئن برای شیب‌های موجود در حفاری‌ها (مانند معادن روباز، حفاری راه‌ها و...) و یا تعیین شرایط تعادل در شیب‌های طبیعی صورت می‌گیرد. امروزه مهندسان روش‌های زیادی جهت آنالیز پایداری شیب‌های گوناگونی که از سنگ، خاک و یا ترکیب آنها ساخته شده‌اند، ارائه کرده‌اند. این روش‌ها شامل روش تعادل حدی، روش سینماتیکی، روش تجربی، روش احتمالاتی و روش عددی می‌شود. بسیاری از مشکلات مربوط به آنالیز پایداری شیب‌های سنگی زمانی بروز می‌کند که با ترکیب پیچیده‌ای از چند عامل گوناگون مثل ژئومتری، ناهمسان‌گردی مواد سازنده شیب، رفتار غیرخطی و تنش‌های محلی روبه‌رو هستیم. این در حالی است که می‌توانیم شرایطی به مراتب پیچیده‌تر نیز داشته باشیم. یعنی عواملی مانند فشار منفذی، نیروهای ناشی از زمین لرزه و ... نیز مورد نظر باشند. در چنین شرایطی می‌توان از قدرت تخمین و محاسبه بالا و نیز توانایی قابل قبول روش‌های عددی بهره گرفت. بدین معنا که با استفاده از آنالیز مبتنی بر روش‌های عددی پیشرفته می‌توان در بسیاری از موارد به شبیه‌سازی مناسب پتانسیل ریزش و مکانیزم آن پرداخته و شیب سنگی را مورد تحقیق و بررسی قرار داد.

روش‌های عددی مورد استفاده در آنالیز پایداری شیب‌های سنگی به سه دسته کلی تقسیم می‌شوند که عبارتند از (Eerhardt, 2003):

- مدل‌سازی در محیط پیوسته

- مدل‌سازی در محیط غیرپیوسته

- مدل‌سازی هیبریدی یا ترکیبی

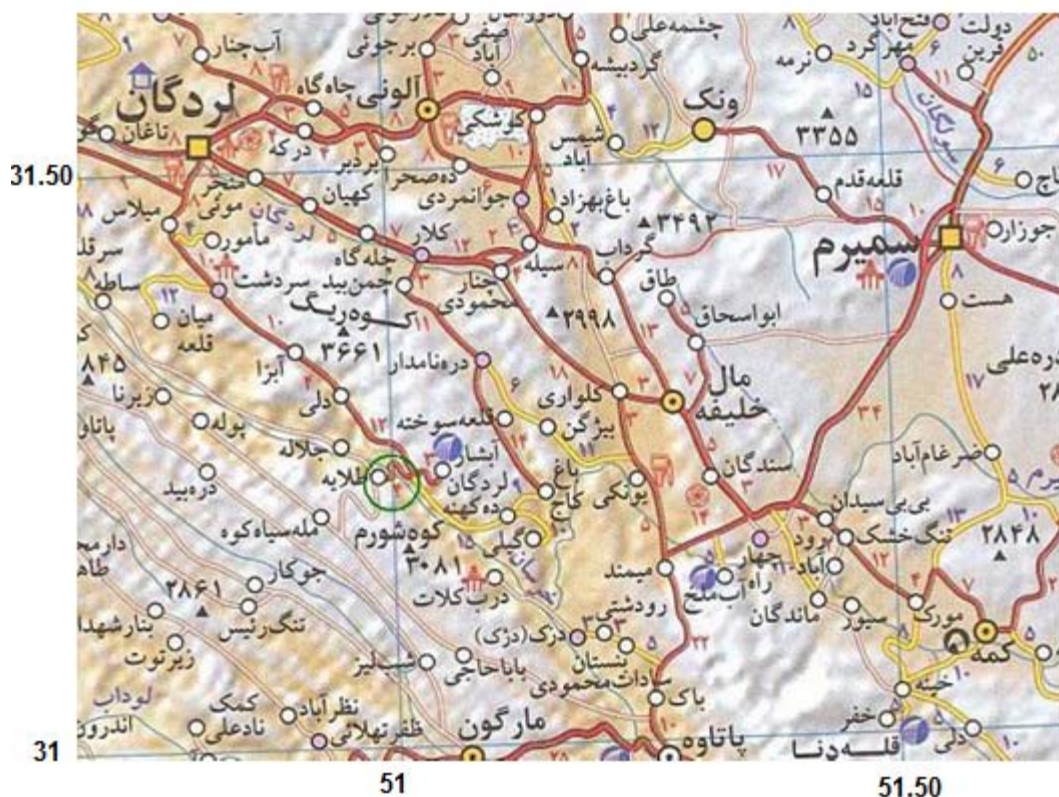
مدل‌سازی در محیط پیوسته بهترین روش برای آنالیز شیب‌هایی است که شامل سنگ توده‌ای، سنگ بکر، سنگ‌های سست، سنگ‌های خاک مانند و توده سنگ‌های به شدت خرد شده هستند. مدل‌سازی در محیط غیرپیوسته در مورد شیب‌هایی بحث می‌کند که در توده‌سنگ دارای ناپیوستگی ایجاد شده‌اند (Eerhardt, 2003).

آتشفشانی در این منطقه وجود نداشته و منحصراً در گنبد‌های نمکی آثاری از سنگ‌های نفوذی از قبیل دیاباز مشاهده شده است.

از لحاظ فعالیت‌های دگرگونی نیز به جز قطعاتی از سنگ‌های دگرگونی که در گنبد‌های نمکی مشاهده شده بیرون‌زدگی از این سنگ‌ها وجود ندارد (شرکت توسعه منابع آب و نیروی ایران، ۱۳۸۸).

روند کلی این زون شمال غرب - جنوب شرق و ساختمان زمین‌شناسی آن ساده، ملایم و شامل مجموعه‌ای از تاقدیس‌های نزدیک به هم و فشرده با سطح محوری تقریباً قائم می‌باشند رسوبات چین‌خورده این منطقه تناوبی از آهک، دولومیت، آهک مارنی و مارن می‌باشند که دارای چین‌بندی منظم هستند.

به طور کلی رسوبات ضخیم زاگرس در مراحل آخر کوهزایی آلپی یعنی زمان پلیو-پلیستوسن چین‌خورده است فعالیت‌های



شکل ۱. موقعیت کلی طرح سد و نیروگاه خرسان ۳ (شرکت توسعه منابع آب و نیروی ایران، ۱۳۸۸)

تشکیل می‌دهند ضخامت بخش زیرین آسماری در محدوده محل سد حدود ۲۵۰ متر برآورد می‌گردد.

بخش بالایی آسماری از آهک‌های ضخیم لایه به رنگ قهوه‌ای روشن همراه با میان لایه‌هایی از جنس مارن که دارای درصد بسیار کمی می‌باشند تشکیل یافته‌اند. در ترازهای بالاتر بدلیل ماسیو بودن آنها عمدتاً صخره‌ساز بوده و به همین دلیل شیب توپوگرافی آنها بیش از ۷۵ درجه می‌باشد.

سنگ‌های تشکیل‌دهنده محدوده تکیه‌گاه‌ها و پی سد را سازند آسماری تشکیل می‌دهد این سازند به دلیل تنوع لیتولوژیکی و خصوصیات چینه‌شناسی به دو بخش آسماری زیرین و آسماری بالایی تقسیم شده است. مرز بین دو واحد مذکور را آهک‌های فسیل‌دار و آواری تشکیل می‌دهد.

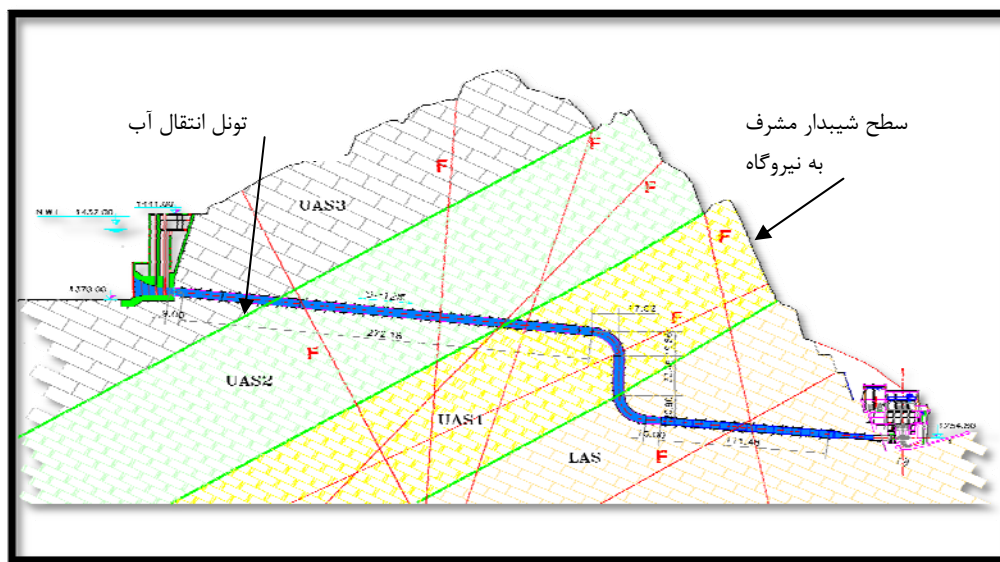
بخش زیرین آسماری را تناوبی از سنگ‌های آهکی با ضخامت متوسط، آهک‌های مارنی و مارن و درصد کمی دولومیت

**جدول ۱. مشخصات ناپیوستگی ها (شرکت توسعه منابع آب و نیروی ایران، ۱۳۸۹)**

شماره دسته درزه و گسل ها	جهت شیب (درجه)	اندازه شیب (درجه)
J1	۵۵	۸۵
J2	۲۶۰	۷۵
J3	۱۷۵	۶۵
F1	۱۷۰	۸۰
F2	۵۵	۳۵
F3	۶۰	۳۰
F4	۳۸	۵۲
F5	۱۵	۷۵

در بالادست محور سد واحد آسماری بالایی تنوع لیتولوژیکی بیشتری را از خود نشان می دهد. براساس نقشه های زمین شناسی تهیه شده آسماری فوقانی به چهار زیر واحد با علائم UAS1 تا UAS4 تقسیم بندی شده است. با توجه به مطالعات درزه نگاری انجام شده در محدوده نیروگاه علاوه بر صفحات لایه بندی که دارای جهت شیب/شیب ۷۵-۳۵/۶۵ می باشند، ناپیوستگی های دیگری نیز وجود دارد که در جدول (۱) ارائه شده است. در شکل (۲) شیب مشرف به نیروگاه نشان داده شده است.

خصوصیات ژئومکانیکی مصالح سنگی تشکیل دهنده شیب و چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی در امتداد ناپیوستگی های موجود در شیب را در جداول (۲ و ۳) مشاهده می کنید.



**شکل ۲. شیب مشرف به نیروگاه (شرکت توسعه منابع آب و نیروی ایران، ۱۳۸۹)**

**جدول ۳. چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی در امتداد ناپیوستگی ها (شرکت توسعه منابع آب و نیروی ایران، ۱۳۸۹)**

زاویه اصطکاک (°)	چسبندگی (MPa)	ناپیوستگی
۳۵	۰/۰۵	گسل
۳۵	۰/۰۵	لایه بندی
۳۶	۰/۰۵	دسته درزه ۱
۴۰	۰/۱	دسته درزه ۲

**جدول ۲. خصوصیات ژئومکانیکی مصالح سنگی (شرکت توسعه منابع آب و نیروی ایران، ۱۳۸۹)**

نام واحد	دانسیته (t/m <sup>3</sup> )	مدول الاستیک (GPa)	ضریب پواسن
LAS	۲/۶	۱۳	۰/۲
UAS1	۲/۶	۱۴	۰/۲
UAS2	۲/۶	۱۵	۰/۲
UAS3	۲/۶	۸	۰/۲

قبل از تحلیل پایداری سطح شیبدار تحت بار زلزله تحلیل پایداری تحت بارگذاری استاتیکی برای کالیبراسیون مدل ضروری است.

برای ساخت مدل توسط نرم افزار UDEC، می بایست سه مرحله زیر انجام شود:

- ساخت بلوک به منظور ایجاد ژئومتری شبیهی که باید تحلیل شود.

- تعریف مدل رفتاری و خصوصیات مواد سنگی و ناپیوستگی ها

- تعیین شرایط مرزی و اولیه

به منظور تحلیل پایداری شیروانی مورد مطالعه، هندسه مدل توسط نرم افزار UDEC شبیه سازی شد. مدل فوق دارای ارتفاع حدود ۳۲۰ متر و گسترش طولی حدود ۳۰۰ متر می باشد.

شیروانی مورد مطالعه دارای ناپیوستگی هایی شامل ۵ گسل، یک صفحه لایه بندی و ۲ دسته درزه می باشد. برای مدل کردن دسته درزه ها مقدار شیب و مختصات آنها لازم است. مدل رفتاری در نظر گرفته شده برای بلوک های تغییر شکل پذیر و ناپیوستگی ها در مدل سازی شیروانی مذکور، به ترتیب مدل الاستیک همسان گرد و مدل لغزش کولمب با سطح تماس صفحه ای می باشد. در مدل سازی دو نوع مرز وجود دارد:

مرزهای حقیقی و مرزهای مصنوعی؛ مرزهای حقیقی به طور فیزیکی وجود دارند (مانند سطح تونل و یا سطح زمین)، اما مرزهای مصنوعی وجود فیزیکی ندارند و جهت محدود نمودن مدل و مش بندی (شبکه بندی) اعمال می شوند (Itasca Consulting group, 1993). در مدل ساخته شده به

منظور اینکه شرایط مرزی با شرایط واقعی زمین یکسان سازی گردد در تعیین شرایط مرزی به گونه ای عمل شد که در جهت محور قائم مقدار بردار سرعت در جهت  $x$  (x.velocity) و در جهت محور افقی مقدار بردار سرعت در جهت  $y$  (y.velocity) برابر با صفر در نظر گرفته شد. جهت به دست آوردن مقادیر تنش ها در جهت قائم و افقی از روابط (۱) و (۲) استفاده گردید (Itasca Consulting group, 1993).

### ۳. تحلیل پایداری سطوح شیبدار مشرف به ساختگاه نیروگاه سد خرسان ۳

تحلیل پایداری سطوح شیبدار به کمک مدلسازی عددی به وسیله نرم افزار UDEC<sup>2D</sup> در دو حالت تحت بارگذاری استاتیکی و زلزله و همچنین روش تعادل حدی انجام شده است. روش تحلیل ها به صورت مجزا در سه بخش توضیح داده شده است.

#### ۳-۱. تحلیل پایداری سطوح شیبدار مشرف به ساختگاه نیروگاه سد خرسان ۳ تحت بارگذاری استاتیکی

نرم افزار UDEC یک ابزار مدلسازی دو بعدی است که براساس روش اجزاء مجزا، برای مدلسازی محیط های ناپیوسته، بکار می رود. این نرم افزار قادر می باشد که محیط های ناپیوسته، مانند توده سنگ های درزه دار را تحت شرایط بارگذاری دینامیکی یا استاتیکی شبیه سازی و تحلیل نماید.

یک محیط ناپیوسته را می توان ترکیبی از بلوک های مجزا در نظر گرفت که ناپیوستگی ها به عنوان شرایط مرزی بین این بلوک ها عمل می کنند. بنابراین، این برنامه می تواند جابجایی های بزرگ در طول ناپیوستگی ها و چرخش بلوک ها را مورد تحلیل قرار دهد. رفتار بلوک ها را می توان به صورت مصالح صلب تغییر شکل پذیر در نظر گرفت. بلوک های تغییر شکل پذیر خود به شبکه ای از المان های با عناصر تفاضل محدود تقسیم شده که هر المان براساس قانون تنش - کرنش، رفتار خطی یا غیرخطی دارد. جابجایی نسبی ناپیوستگی ها، به وسیله روابط خطی یا غیرخطی جابجایی - نیرو، کنترل می شود (Itasca Consulting group, 1993).

UDEC دارای چندین مدل رفتاری، برای بلوک های بکر (ماده سنگ) و ناپیوستگی ها است، که می تواند مدل رفتاری ناپیوستگی های ساختاری و لایه های زمین شناسی را به رفتار واقعی آنها نزدیک کند. UDEC براساس روش حل لاگرانژی (Lagrangian) عمل می کند، که روش بسیار مناسبی برای جابجایی های بزرگ و تغییر شکل سیستم های بلوکی است.

ساختگاه سد خرسان ۳ که سنگ سخت می‌باشد، مقادیر جدول (۴) حاصل شده است.

جدول ۴. مقادیر دوره بازگشت و مقادیر بیشینه شتاب برای سطوح لرزه‌ای مختلف (شرکت توسعه منابع آب و نیروی ایران، ۱۳۸۷)

بیشینه مقدار شتاب (g)		دوره بازگشت (سال)	سطح لرزه‌ای در طراحی
مولفه قائم	مولفه افقی		
۰/۱۱	۰/۱۸	۱۵۰	سطح مبنای بهره‌برداری
۰/۱۸	۰/۲۶	۵۰۰	سطح مبنای طراحی
۰/۲۷	۰/۳۷	۲۰۰۰	سطح بالای طراحی

لازم به بیان است که انتخاب سطوح طراحی لرزه‌ای بر اساس احتمال فزونی (یا دوره بازگشت) و هم‌چنین عمر مفید و اهمیت سد و خطرپذیری وابسته به آن در نظر گرفته شده است. بر این اساس دوره بازگشت زمین‌لرزه طراحی OBE، DBE و MDE حدود ۱۵۰، ۵۰۰ و ۲۰۰۰ سال خواهد بود. برای انتخاب شتاب‌نگاشت زمین‌لرزه‌ها، به چهار ویژگی توجه بیشتری شده است، این ویژگی‌ها عبارتند از بزرگای هدف، فاصله چشمه لرزه‌زای زمین‌لرزه تا ایستگاه شتاب‌نگار، سازوکار زمین‌لرزه و شرایط ژئوتکنیک لرزه‌ای ایستگاه شتاب‌نگار، در این راستا کوشش شده است که این ویژگی‌ها با ویژگی‌های ساختگاه سد خرسان ۳ تا حدودی تطبیق داده شود. مناسب‌ترین رکورد، رکورد زلزله زنجیران برای سطح مبنای بهره‌برداری و رکورد زلزله مسجد سلیمان برای سطح مبنای طراحی می‌باشد. در شکل (۳) طیف پاسخ شتاب، سرعت و جابجایی اصلاح نشده زمین‌لرزه زنجیران که توسط نرم‌افزار SeismoSignal انجام شده ارائه شده است. در جدول (۵) پارامترهای جنبش نیرومند زمین برای رکورد زلزله زنجیران و زلزله مسجد سلیمان (اصلاح نشده) ارائه شده است.

$$\sigma_v = \rho \cdot g \cdot h \quad (1)$$

$$\sigma_h = k \sigma_v \quad (2)$$

در این روابط  $\sigma_v$  تنش در جهت قائم،  $\rho$  دانسیته،  $g$  شتاب جاذبه،  $h$  ارتفاع،  $\sigma_h$  تنش افقی و  $U$  ضریب پواسون می‌باشند.

به دلیل عدم انجام آزمایش‌های برجا برای اندازه‌گیری تنش‌ها، چون در منطقه گسل‌ها از نوع گسل معکوس می‌باشند پس  $\sigma_1$  افقی است در نتیجه  $k$  بزرگتر از یک می‌باشد برای محاسبه تنش افقی از میانگین روابط (۳) تا (۵) استفاده شده است (رحیمی و همکاران، ۱۳۸۸).

$$\sigma_h = 2/8 + 1/48 \sigma_v \quad (3)$$

$$\sigma_h = 1/5 + 1/2 \sigma_v \quad (4)$$

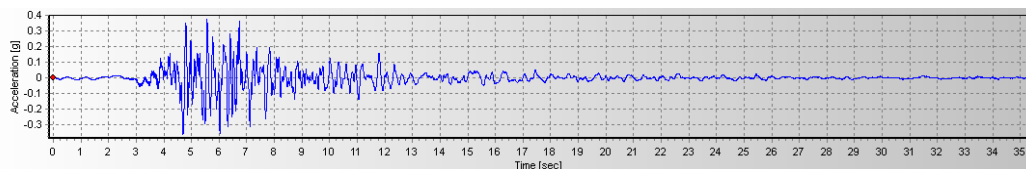
$$\sigma_h = \frac{12/60}{\sqrt[3]{2}} \sigma_v \quad (5)$$

قبل از اعمال تغییرات در مدل، می‌بایست مدل را به تعادل اولیه رساند. پس از ایجاد تعادل، تغییرات مورد نظر به صورت حفاری مواد در مدل اعمال شد.

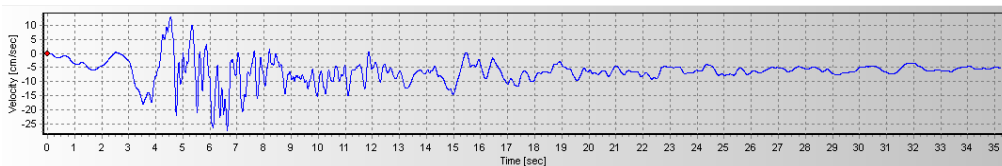
### ۳-۲- تحلیل پایداری سطوح شیب‌دار مشرف به ساختگاه نیروگاه سد خرسان ۳ تحت بارگذاری زلزله به کمک نرم‌افزار UDEC

۳-۲-۱. مطالعات لرزه‌خیزی و تحلیل خطر زلزله سد خرسان ۳ بر اساس مدل چشمه‌های لرزه‌زا در گستره مورد مطالعه سد خرسان ۳، پارامترهای لرزه‌خیزی حاصل از گستره شعاعی ۱۰۰ کیلومتری محاسبه و به هر یک از چشمه‌ها به صورت مناسب با توجه به لرزه‌خیزی آن نسبت داده شده است.

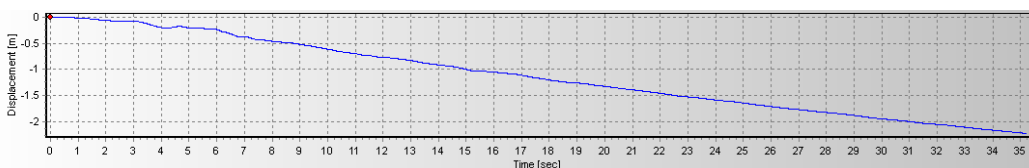
بر اساس این روش و با در نظر گرفتن دوره بازگشت رویداد ۱۵۰، ۵۰۰ و ۲۰۰۰ سال به ترتیب برای زمین‌لرزه سطح مبنای بهره‌برداری، سطح مبنای طراحی و سطح بالای طراحی در



الف



ب



ج

شکل ۳. نمودار طیف پاسخ اصلاح نشده زلزله زنجیران الف (شتاب ب) سرعت ج) جابجایی

جدول ۵. پارامترهای جنبش نیرومند زمین برای رکورد زلزله زنجیران در جدول جنبش نیرومند زمین را برای رکورد زلزله زنجیران در جدول (۶) آورده شده است.

جدول ۶. پارامترهای جنبش نیرومند زمین برای رکورد زلزله

زنجیران (اصلاح شده)

نام زلزله	پارامترها		
	جابجایی (m)	سرعت (cm/sec)	شتاب (g)
زنجیران	۱/۱۱۴	۱۳/۶۱۰	۰/۱۸

۳-۲-۲. فرایند تحلیل دینامیکی

به طور کلی فرایند تحلیل دینامیکی در نرم‌افزار UDEC به شرح زیر می‌باشد:

- ۱- تعیین مرزهای دینامیکی
- ۲- انتخاب میرایی مدل
- ۳- ابعاد المان‌های مدل
- ۴- اعمال بارگذاری دینامیکی

در این بخش این فرآیند به طور مختصر توضیح داده می‌شود. در یک مدل دینامیکی صحیح، امواج ورودی به مدل باید میرا گشته و از بین بروند تا بتوان شرایط واقعی مدل را مدل‌سازی نمود. بنابراین تعریف شرایط مرزی برای مدل ضروری می‌باشد. به طور کلی دو نوع مرز برای مدل می‌توان تعریف کرد که شامل مرز ویسکوز و مرز آزاد می‌باشد. در مدل‌سازی

جدول ۵. پارامترهای جنبش نیرومند زمین برای رکورد زلزله زنجیران و زلزله مسجد سلیمان (اصلاح نشده)

نام زلزله	پارامترها		
	جابجایی (m)	سرعت (sec/cm)	شتاب (g)
زنجیران	۲/۲۲۸	۲۷/۲۱۹	۰/۳۷۶
مسجد سلیمان	۰/۲۰۴	۱۰/۵۸۳	۰/۳

در جدول (۵) بیشینه شتاب ثبت شده در ایستگاه زنجیران و مسجد سلیمان به ترتیب برابر ۰/۳۷۶ و ۰/۳ است. مقدار بیشینه شتاب ثبت شده در ایستگاه زنجیران با بیشینه شتاب بدست آمده از تحلیل خطر زلزله برای زلزله مبنای بهره‌برداری تفاوت دارد. بنابراین لازم است تا شتاب‌نگاشت پایه نسبت به مقادیر مورد نظر مقیاس شود. ضریب مقیاس به صورت نسبت بیشینه شتاب هدف به بیشینه شتاب پایه تعریف می‌گردد. با ضرب کردن ضرایب مقیاس اخیر در تاریخچه شتاب و سرعت زلزله زنجیران می‌توان تاریخچه زمانی شتاب و سرعت زلزله‌های طراحی را بدست آورد. اصلاح شتاب‌نگاشت‌های مذکور توسط نرم‌افزار SeismoSignal صورت گرفته است (Seismosoft, 2011). به عنوان نمونه پارامترهای اصلاح شده

موج زلزله در مدل جلوگیری شود. بروز این مشکل بستگی به سرعت انتقال موج در محیط، محتوای فرکانسی موج ورودی و هم چنین فرکانس ارتعاش آزاد مدل دارد. این پدیده معمولاً به دلیل ابعاد بزرگ المان‌ها و شرایط مرزی نادرست اتفاق می‌افتد و سبب می‌شود که شکل موج عبوری تفاوت زیادی با بارگذاری اولیه پیدا کند. بنابراین لازم است تا قبل از شروع تحلیل‌های اصلی، این مساله مورد بررسی قرار گیرد. پایداری مدل‌سازی عددی جهت عبور موج در گرو ابعاد المان است. باید بزرگترین بعد المان  $l$ ، کوچکتر از یک دهم تا یک هشتم طول موج بزرگترین فرکانس موج ورودی باشد (روابط ۶ و ۷) (Itasca Consulting group, 1993).

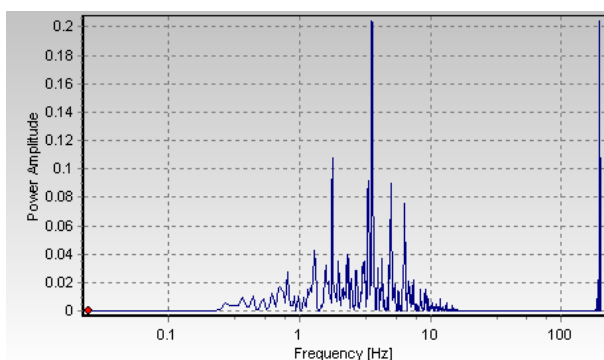
$$l_{\max} \leq \left(\frac{1}{8} - \frac{1}{10}\right) \frac{C_s}{f_{\max}} \quad (6)$$

$$\lambda_{\max} = \frac{C_s}{f_{\max}} \quad (7)$$

$C_s$ : سرعت موج برشی

$f_{\max}$ : بزرگترین فرکانس تاریخچه زمانی موج

در این تحقیق برای سطح مبنای بهره‌برداری و سطح مبنای طراحی بزرگترین فرکانس تاریخچه زمانی موج ۱۵ هرتز تعیین شده است. در شکل (۴) فرکانس زلزله اصلاح شده زنجیران به عنوان نمونه ارائه شده است. با داشتن سرعت موج برشی (۱۷۸۷ متر بر ثانیه)، از رابطه (۶) بزرگترین بعد المان جهت انتقال صحیح موج در مدل، محاسبه شده است. بزرگترین بعد المان مجاز محاسبه شده در این تحقیق ۱۵ متر می‌باشد. به دلیل اینکه ابعاد المان‌های مدل ۵ متر می‌باشد ابعاد المان‌های مدل ساخته شده مناسب است.



شکل ۴. فرکانس زلزله اصلاح شده زنجیران توسط نرم افزار

Seisimosignal

دینامیکی لازم است که ابعاد مدل با مرزهای مصنوعی محدود شود. وجود این نوع مرزها باعث می‌شود موج پس از برخورد به آنها منعکس شود و دوباره به مدل برگردد. در نتیجه نتایج صحیحی از تحلیل بدست نمی‌دهد. با توجه به اینکه امواج میرا می‌شوند، می‌توان از مدل‌های بزرگ استفاده کرد ولی این کار زمان و حافظه مورد نیاز برای تحلیل را افزایش می‌دهد. در نتیجه برای رهایی از این مشکل از مرزهای ویسکوز که جاذب انرژی هستند استفاده می‌گردد. UDEC از مرزهای ویسکوز پیشنهاد شده توسط لایزمر و کولمیر (Lysmer and Kuhlemeyer) استفاده می‌کند. وجود مرز آزاد باعث می‌شود که موج عبوری از نزدیک مرزها تحت تأثیر پاسخ سازه قرار نگرفته و شکل موج مشابه موج ورودی باشد.

هر سیستم دینامیکی دارای میرایی داخلی است. در صورت عدم میرایی، ارتعاش یک سیستم مکانیکی در معرض نیروهای محرک تا ابد ادامه می‌یابد. مقداری از میرایی به واسطه افت انرژی در اثر لغزش در طول تماس بلوک‌های درون سیستم و قسمتی نیز به واسطه افت اصطکاکی درون مواد بکر و مقاومت ایجاد شده به وسیله هوا و یا سیالات در برگیرنده سازه و یا لغزش بر روی درزه‌ها صورت می‌گیرد. در نرم‌افزار UDEC از دو نوع میرایی استفاده می‌شود که شامل میرایی رایلی و موضعی می‌باشد (Itasca Consulting group, 1993). در این تحقیق برای سرعت بخشیدن به آنالیزها از میرایی موضعی استفاده گردیده است.

این میرایی با استفاده از رابطه (۵) در برنامه نرم‌افزار قابل اجرا می‌باشد.

$$\alpha_L = \pi D \quad (5)$$

در اینجا  $\alpha_L$  ضریب میرایی موضعی می‌باشد.  $D$  میرایی بحرانی است. بنابراین استفاده از میرایی موضعی شبیه به میرایی رایلی است با این تفاوت که در اینجا نیازی به تعیین مقدار فرکانس وجود ندارد (Itasca Consulting group, 1993). ضریب میرایی ۵ درصد در نظر گرفته شده است. برای آماده کردن مدل جهت تحلیل دینامیکی نیاز است تا اندازه المان‌ها جهت انتقال صحیح موج زلزله، مورد بررسی قرار گیرد تا از اعوجاج



استفاده از رابطه (۱۲) فاکتور ایمنی تعیین می‌گردد (Li et al., 2008). به عنوان نمونه یکی از نمودارهای حاصل از مطالعات لی و همکارانش به ازای  $K_h = 0.3$  و برای مقدار شیب  $60^\circ$  درجه در شکل (۵) آورده شده است. پارامترهای مورد نیاز جهت تحلیل پایداری در جدول (۷) آورده شده است.

$$N = \frac{S_{ci}}{gHF} \quad (12)$$

$g$ : وزن مخصوص توده سنگ

$H$ : ارتفاع شیروانی

$F$ : فاکتور اطمینان شیروانی

$S_{ci}$ : مقاومت فشاری توده سنگ

$N$ : عدد پایداری

جدول ۷. پارامترهای ژئومکانیکی و پارامترهای هندسی

شیروانی (شرکت توسعه منابع آب و نیروی ایران، ۱۳۸۸)

مقادیر	پارامتر	
۲۹۱/۲	ارتفاع شیروانی (متر)	پارامترهای هندسی
۶۰	شیب شیروانی (درجه)	
۶۵		
۴۷/۸۸	شاخص مقاومت زمین شناسی	پارامترهای ژئومکانیکی توده سنگ
۷۰	مقاومت فشاری توده سنگ (مگاپاسکال)	
۲۶۰۰	وزن مخصوص توده سنگ (کیلوگرم بر متر مکعب)	
۷/۵	ثابت ماده سنگ	

#### ۴. نتایج تحلیل

در این بخش نتایج تحلیل استاتیکی، دینامیکی و تعادل حدی به صورت مجزا ارائه می‌گردد.

##### ۴-۱. نتایج تحلیل استاتیکی به کمک نرم‌افزار UDEC

نتایج حاصل از تحلیل عددی با استفاده از نرم‌افزار UDEC در جدول (۸) بیان شده است. شکل (۶) کنتورهای جابجایی افقی و شکل (۷) کنتورهای جابجایی قائم را در شیروانی نشان می‌دهد.

در نرم‌افزار UDEC مقدار تنش نرمال و برشی که به مدل اعمال می‌شود را می‌توان به ترتیب از روابط (۸) و (۹) محاسبه کرد (Itasca Consulting group, 1993).

$$\sigma_n = 2(\rho C_p) v_n \quad (8)$$

$$\sigma_s = 2(\rho C_s) v_s \quad (9)$$

$$C_p = \sqrt{\frac{K+4G/3}{\rho}} \quad (10)$$

$$C_s = \sqrt{G/\rho} \quad (11)$$

که در این روابط  $\sigma_n$  تنش نرمال،  $\sigma_s$  تنش برشی،  $\rho$  جرم مخصوص،  $v_n$  و  $v_s$  سرعت‌های نرمال و مماسی،  $C_s$  و  $C_p$  سرعت انتشار موج برشی و فشاری،  $K$  مدول الاستیسیته و  $G$  مدول برشی است (Itasca Consulting group, 1993).

۳-۳. تحلیل پایداری سطوح شیبدار مشرف به ساختگاه نیروگاه سد خرسان ۳ به کمک روش تعادل حدی و با استفاده از نمودار

(Li et al., 2008) با استفاده از روش تعادل حدی پایداری شیب‌های سنگی را تحت بارگذاری زلزله مطالعه کرده و نمودارهایی ارائه داده‌اند. در این مطالعه در یک چارچوب آنالیز حدی، یک روش شبه استاتیکی بکار گرفته شده و نمودارهای تحلیل پایداری به ازای مقادیر مختلف ضرایب زلزله تهیه شده است. این نمودارها برای ماده سنگ همگن و ایزوتروپ و یا توده سنگ شدیداً درزه‌دار نتایج معتبری تولید می‌کنند. در روش‌های شبه استاتیکی شدت بار دینامیکی زلزله با ضریب زلزله  $K_h$  بیان می‌شود. برای تعیین ضریب زلزله  $K_h$  براساس مقدار ریشتر زلزله می‌توان از نمودارهای پیشنهادی مدرسه عالی معدن کالیفرنیا استفاده نمود. در این نمودار ابتدا یک ضریب اطمینان بزرگتر از ۱ در نظر گرفته می‌شود و با توجه به مقدار ریشتر، ضریب زلزله متناظر تعیین می‌شود.

برای تحلیل یک شیب سنگی، ابتدا پارامترهای ژئومکانیکی  $GSI$ ،  $m_i$  و  $S_{ci}$  تعیین و با توجه به ضریب زلزله و شیب شیروانی عدد پایداری ( $N$ ) از روی نمودار تعیین می‌گردد. با استفاده از ارتفاع شیروانی و وزن مخصوص مصالح سنگی با

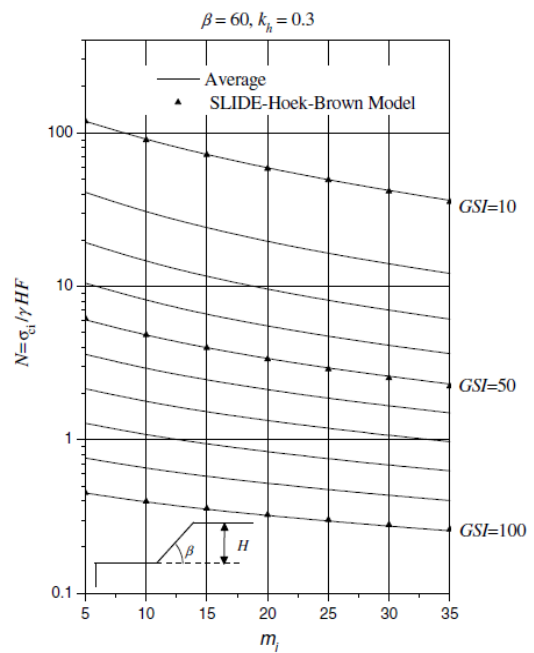
از تحلیل عددی نشان می‌دهد که شیروانی مذکور ناپایدار است.

**جدول ۸ خلاصه نتایج تحلیل عددی شیروانی مورد مطالعه**

نتایج تحلیل	پارامترها
۳/۰۱۵	حداکثر جابجایی کلی بلوک ها (متر)
۲/۵	حداکثر جابجایی قائم (متر)
۱/۶	حداکثر جابجایی افقی (متر)
۲/۶۸۹	حداکثر جابجایی برشی (متر)

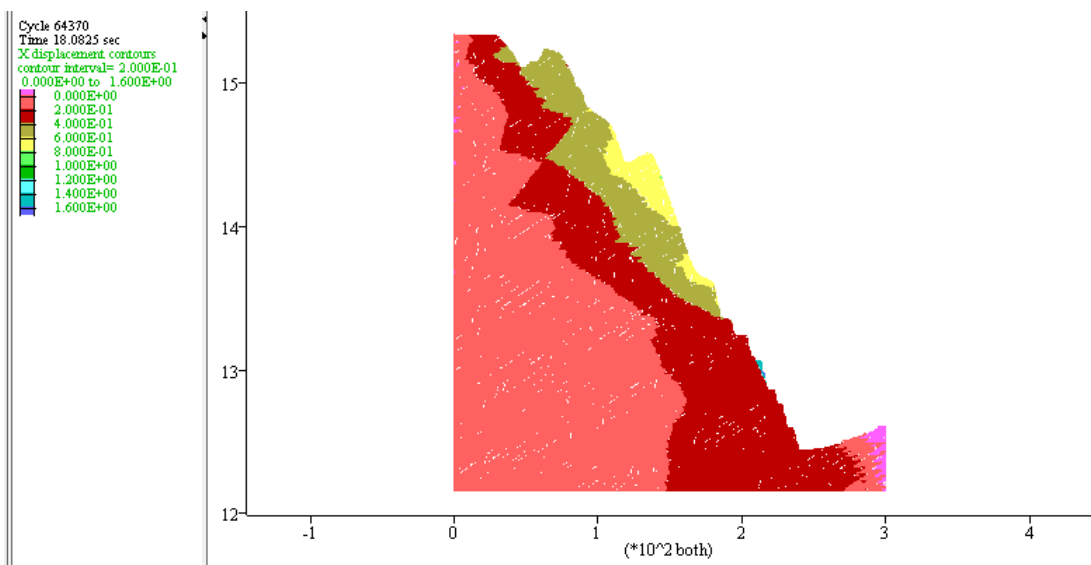
۴-۲. نتایج تحلیل دینامیکی به کمک نرم‌افزار UDEC تحلیل پایداری شیروانی مشرف به ساختمان نیروگاه سد خرسان ۳ تحت بارگذاری دینامیکی با استفاده از روش عددی و با استفاده از نرم‌افزار UDEC صورت پذیرفته است. نتایج حاصل از تحلیل عددی نشان می‌دهد که شیروانی مذکور ناپایدار است.

نتایج حاصل از تحلیل دینامیکی با استفاده از نرم‌افزار UDEC برای دو سطح مبنای طراحی و سطح مبنای بهره‌برداری در جدول (۹) بیان شده است.

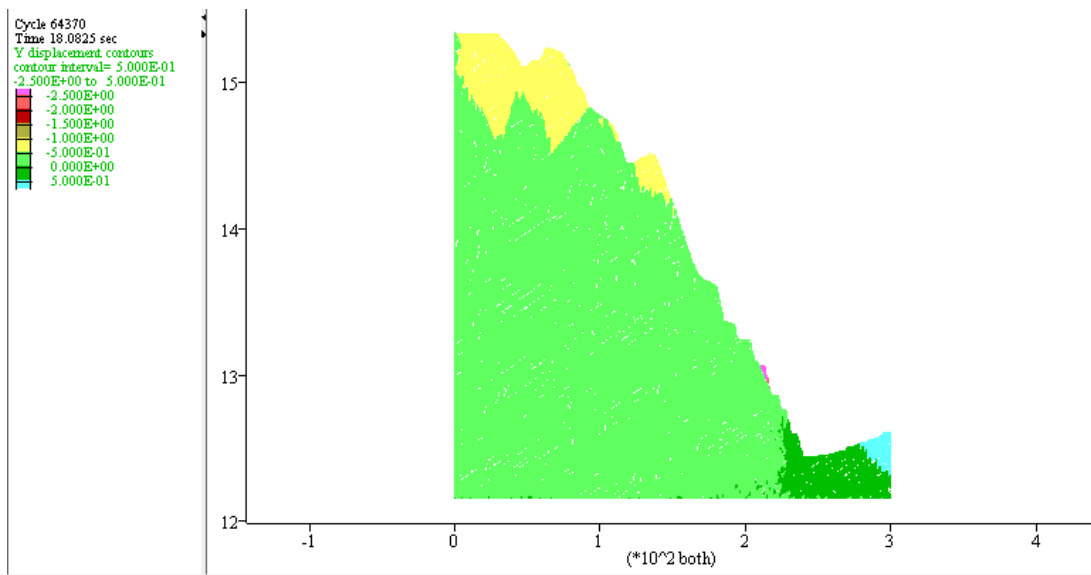


شکل ۵. نمودارهای (chart solution) حاصل از روش تعادل حدی (Li et al., 2008)

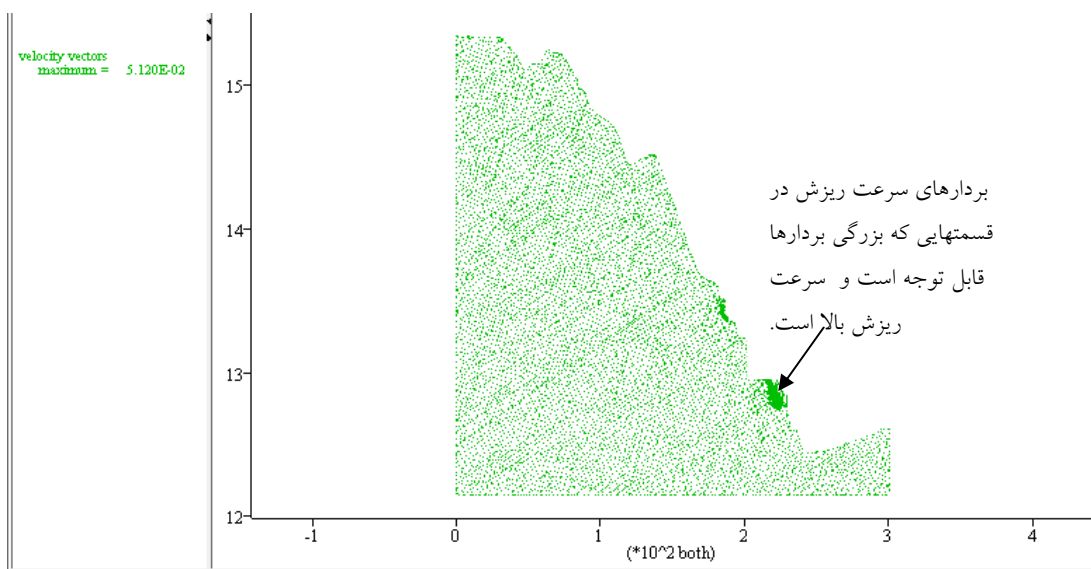
حداکثر جابجایی شیروانی ۳/۰۱۵ متر، حداکثر جابجایی افقی ۱/۶ متر و حداکثر جابجایی قائم ۲/۵ متر می‌باشد. این مناطق در سطح شیب‌دار قرار دارد همچنین شکل (۸) بردارهای سرعت را نشان می‌دهد حداکثر سرعت ریزش برابر ۰/۰۰۵۱۲ می‌باشد. در شکل (۸) مناطقی که سرعت ریزش آن بالا است و در سطح شیب‌دار قرار دارد مشخص شده است. نتایج حاصل



شکل ۶. کنتورهای جابجایی افقی



شکل ۷. کنتورهای جابجایی قائم



شکل ۸. بردارهای سرعت ریزش

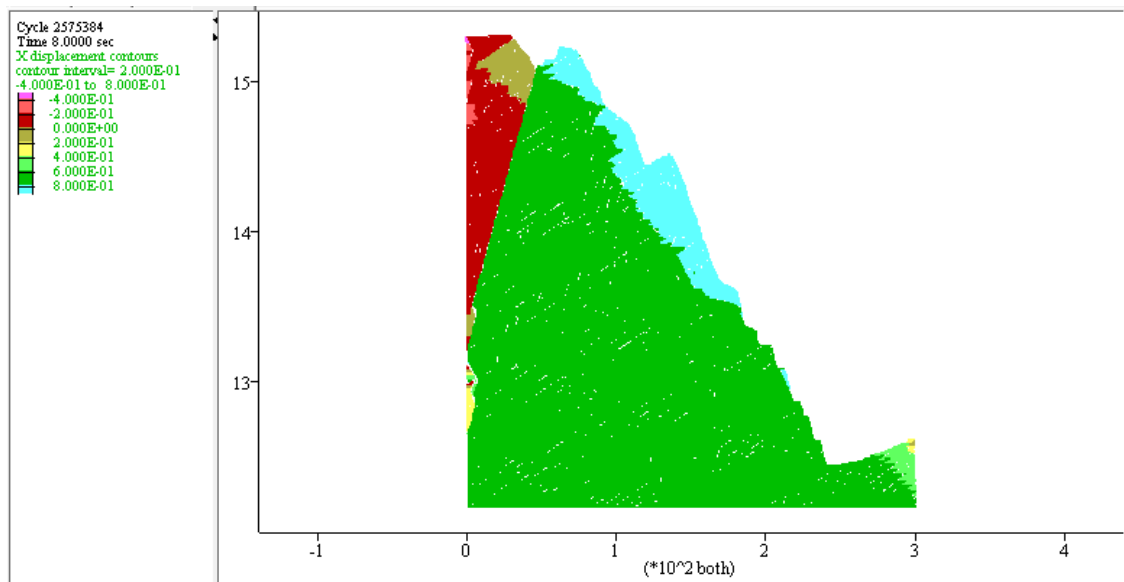
جدول ۹. خلاصه نتایج تحلیل دینامیکی شیروانی مورد مطالعه

نتایج تحلیل	نتایج تحلیل دینامیکی		پارامترها
	سطح مبنای طراحی	سطح مبنای بهره‌برداری	
حداکثر جابجایی کلی بلوک‌ها (متر)	۳/۹۵۸	۳/۰۸۲	۳/۰۱۵
حداکثر سرعت ریزش (متر بر ثانیه)	۱/۸۱۲	۰/۹۰۱۵	۰/۰۰۵۱۲
حداکثر جابجایی برشی (متر)	۲/۸۲۶	۲/۴۰۷	۲/۶۸۹

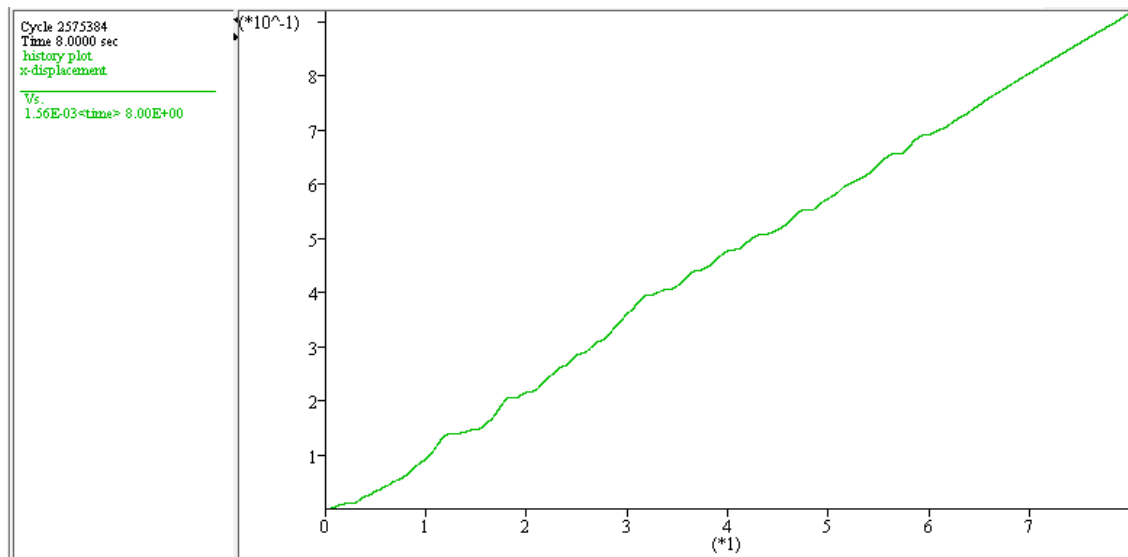
شکل (۹) کنتورهای جابجایی افقی را برای سطح مبنای طراحی نشان می‌دهند. حداکثر جابجایی افقی ۰/۸ متر می‌باشد. هم‌چنین نمودارهای تغییرات جابجایی افقی و قائم به دست آمده در نقطه مشاهده‌ای (روی سطح شیبدار) حاصل از تحلیل پایداری دینامیکی برای سطح مبنای طراحی در شکل‌های (۱۰) و (۱۱) آمده است. همانطور که در اشکال (۱۰) و (۱۱) قابل مشاهده است جابجایی در جهت افقی و جهت قائم روند

جابجایی کلی، برشی و میزان حداکثر سرعت ریزش برای سطح مبنای طراحی بیشتر از سطح مبنای بهره‌برداری است. در ضمن قبل از تحلیل دینامیکی میزان جابجایی‌های ایجاد شده در تحلیل استاتیکی صفر می‌گردد تا جابجایی ایجاد شده ناشی از بارگذاری زلزله مشخص گردد به طوری که در جدول ۹ مشاهده می‌کنید بعد از بارگذاری زلزله برای حالت سطح مبنای طراحی و حالت سطح مبنای بهره‌برداری به ترتیب حداکثر جابجایی کلی ۳/۹۵۸ متر و ۳/۰۸۲ در بلوک‌ها ایجاد می‌شود که نشان‌دهنده ناپایداری سطح شیبدار است.

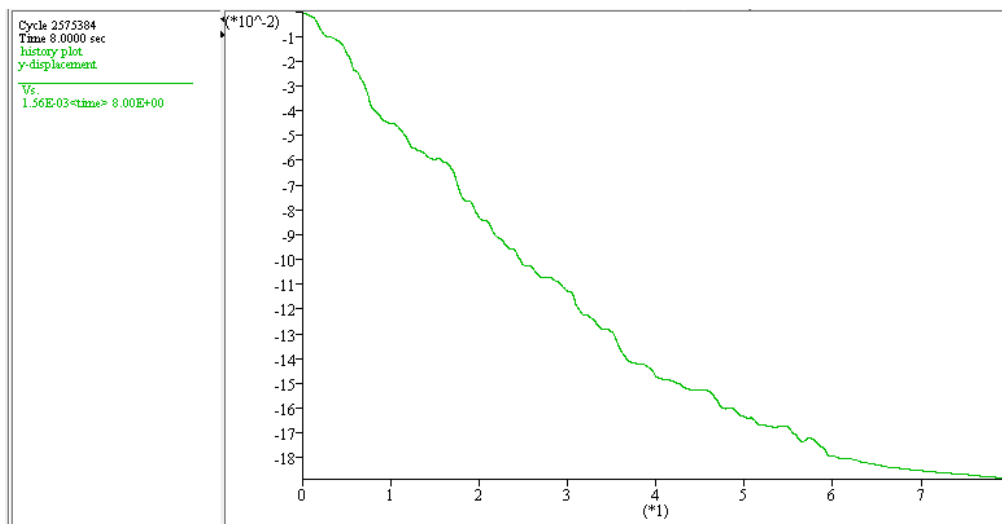
افزایشی دارد ولی سرعت افقی (شیب منحنی در شکل ۱۰) در طول مدت زلزله تقریباً ثابت است در حالیکه سرعت قائم (شیب منحنی در شکل ۱۱) روند کاهشی دارد و در انتهای زلزله به صفر می‌رسد و حرکت بلوک‌ها در جهت قائم متوقف می‌شود در حالیکه حرکت بلوک‌ها در جهت افقی ادامه دارد. لازم به ذکر است این روند در مورد نتایج تحلیل دینامیکی برای سطح مبنای بهره‌برداری نیز وجود دارد. نتایج جدول ۹ نشان می‌دهد به دلیل آنکه در مدل‌سازی عددی حداکثر شتاب افقی برای سطح مبنای طراحی ۰/۲۶g و برای سطح مبنای بهره‌برداری ۰/۱۸g در نظر گرفته شده بود میزان حداکثر



شکل ۹. کنتورهای جابجایی افقی ناشی از بارگذاری دینامیکی برای سطح مبنای طراحی



شکل ۱۰. جابجایی افقی شیروانی ناشی از بارگذاری دینامیکی در نقطه مشاهده‌ای برای سطح مبنای طراحی



شکل ۱۱. جابجایی قائم شیروانی ناشی از بارگذاری دینامیکی در نقطه مشاهده‌ای برای سطح مبنای طراحی

با توجه به جمیع جوانب می‌توان گفت با توجه به اهمیت پایداری سطح شیبدار حداقل ضریب اطمینان ۲ مورد نیاز است در نتیجه شیروانی مذکور ناپایدار است.

#### ۵. نتیجه‌گیری

نتایج تحلیل‌ها نشان می‌دهد:

۱- شیروانی مورد مطالعه تحت بارگذاری استاتیکی ناپایدار می‌باشد.

۲- پس از پایان تحلیل استاتیکی، مدل ساخته شده تحت بارگذاری زلزله زنجیران برای سطح مبنای بهره‌برداری و زلزله مسجدسلیمان برای سطح مبنای طراحی مورد تحلیل دینامیکی قرار گرفت. نتایج حاصل از این تحلیل نشان می‌دهد که شیروانی مشرف به ساختگاه نیروگاه سد خرسان ۳ تحت این بارگذاری ناپایدار می‌باشد.

تحلیل پایداری شبه استاتیکی و محاسبه فاکتور ایمنی شیروانی مشرف به ساختگاه نیروگاه سد خرسان ۳ به ازای ضریب زلزله ۰/۲ و ۰/۳ برای شیب‌های ۶۰ و ۶۵ درجه انجام گردید. نتایج حاصل از این تحلیل نشان می‌دهد که شیروانی مذکور ناپایدار است. که نتیجه مشابه تحلیل پایداری به کمک نرم‌افزار UDEC است.

۴-۳. نتایج تحلیل به کمک روش تعادل حدی و با استفاده از نمودار

با استفاده از تعادل حدی و با استفاده از نمودارهای این روش، پایداری این شیروانی به ازای مقادیر مختلف ضریب زلزله  $(K_h: 0/2$  و  $0/3)$  تحلیل شده است. با توجه به مقادیر پارامترهای جدول (۷) و رابطه (۱۲) فاکتور ایمنی به ازای شیب شیروانی ۶۰ درجه و ۶۵ درجه و ضریب زلزله  $(K_h)$  ۰/۲ و ۰/۳ محاسبه شده است مقادیر فاکتور ایمنی در جدول (۱۰) نشان داده شده است. لازم به ذکر است به دلیل اینکه در تحقیقات ارائه شده توسط لی نموداری برای حالت شیب ۶۵ درجه با  $(K_h)$  ۰/۳ ارائه نشده است در جدول ۱۰ این حالت بررسی نشده است. که قطعاً ضریب ایمنی در این حالت کمتر از ۱/۵ است.

جدول ۱۰. فاکتور اطمینان شیروانی مشرف به ساختگاه نیروگاه

سد خرسان ۳ به روش شبه استاتیکی

ضریب زلزله	پارامتر	شیب (درجه)	عدد پایداری	ضریب اطمینان
۰/۲		۶۵	۵	۱/۸۴
۰/۳		۶۰	۶	۱/۵

## منابع

- رحیمی، ب.، شهریار، ک.، شریف‌زاده، م.، ۱۳۸۸. برآورد تجربی پارامترهای ژئومکانیکی و تنش‌های برجای توده‌سنگ مسیر تونل شماره یک راه‌آهن قزوین - رشت. مجموعه مقالات هشتمین کنفرانس تونل، دانشگاه تربیت مدرس صفحات ۳۹-۳۰.
- شرکت توسعه منابع آب و نیروی ایران، ۱۳۸۷. گزارش لرزه‌خیزی و برآورد خطر زمین‌لرزه، مطالعات مرحله دوم طرح سد مخزنی و نیروگاه خرسان ۳.
- شرکت توسعه منابع آب و نیروی ایران، ۱۳۸۸. گزارش مکانیک سنگ پارامترهای ژئومکانیکی ماده و توده‌سنگ، مطالعات مرحله دوم طرح سد مخزنی و نیروگاه برق‌آبی خرسان ۳.
- شرکت توسعه منابع آب و نیروی ایران، ۱۳۸۹. گزارش زمین‌شناسی مهندسی و ژئوتکنیک، مطالعات مرحله دوم طرح سد مخزنی و نیروگاه برق‌آبی خرسان ۳.
- شریفی، م.، و صالحی، د.، ۱۳۹۰. تحلیل پایداری دینامیکی تکیه‌گاه راست سد گتوند علیا در برابر زلزله. اولین کنفرانس بین‌المللی و سومین کنفرانس ملی سد و نیروگاه‌های برق‌آبی، ایران.
- Azhari, A., Yarahmadi, A., and Faramarzi, L., 2012. Dynamic Analysis of Tectonic Blocks 1 and 2 of Choghart Open-Pit Mines under earthquake. in 9<sup>th</sup> International Congress on Civil Engineering, Isfahan, Iran.
- Eerhardt, E., 2003. Rock Slope Stability Analysis Utilization of Advanced Numerical Techniques. Earth And Ocean sciences at UBC- Vancouver, Canada.
- Itasca Consulting Group, 1993. Universal Distinct Element Code (Version 4). User Manual.
- Li, A.J., Lyamin, A.V. and Merifield, R.S., 2008. Seismic rock slope stability charts based on limit analysis methods. Computers and Geotechnics, vol. 36: 135-148.
- SEISMOSOFT, 2011. SeismoSignal v4.3. Available from URL: <http://www.seismosoft.com>.